

# SIDANG TUGAS AKHIR

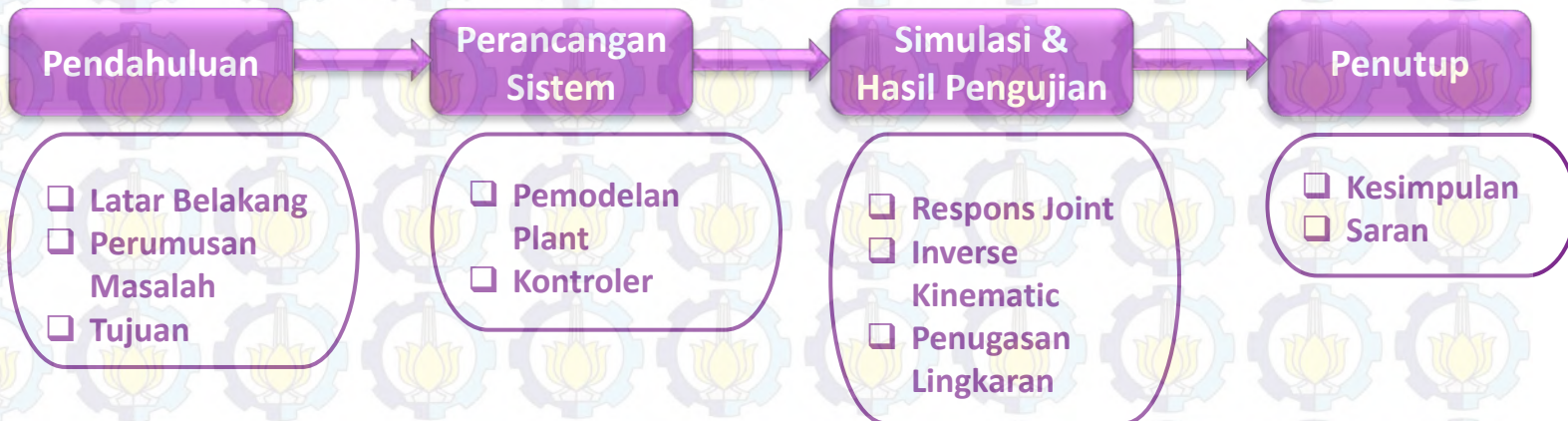
## PENGATURAN GERAK MANIPULATOR PUMA 560 MENGUNAKAN *OPTIMAL COMPUTED TORQUE CONTROL* (*OPTIMAL CTC*)

Oleh: Aditya Rahmat Abdillah (2213105064)  
Dosen Pembimbing: Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.





# OUTLINE





# Pendahuluan





# PENDAHULUAN

## Latar Belakang

1

Penggunaan *manipulator* di industri mampu meningkatkan performa proses produksi dan mengurangi biaya produksi.

2

*Manipulator* merupakan *plant* yang bersifat nonlinear.

3

Besaran tidak terukur seperti gaya friksi pada tiap *joint* muncul saat *manipulator* bergerak.

## Perumusan Masalah

## Tujuan

# PENDAHULUAN

## Latar Belakang

1

Sifat nonlinear dari *manipulator* dan gaya friksi pada tiap *joint* menyebabkan akurasi *manipulator* berkurang, sehingga hasil penugasan tidak sesuai dengan yang diinginkan.

2

Penugasan yang berisi nilai referensi sudut yang bervariasi dalam waktu yang relatif singkat menyebabkan *error tracking* jika respons dari tiap *joint* lambat.

3

Penugasan dalam ruang *joint* menimbulkan kesulitan dalam perencanaan trayektori.

## Perumusan Masalah

## Tujuan



# PENDAHULUAN

## Latar Belakang

1

Merancang kontroler *optimal* CTC sebagai pengatur gerak *manipulator* PUMA 560 dalam ruang *joint*.

2

Merancang *inverse kinematic* melalui *jacobian manipulator* untuk memperoleh nilai-nilai sudut *joint* dari penugasan yang diberikan.

## Perumusan Masalah

## Tujuan



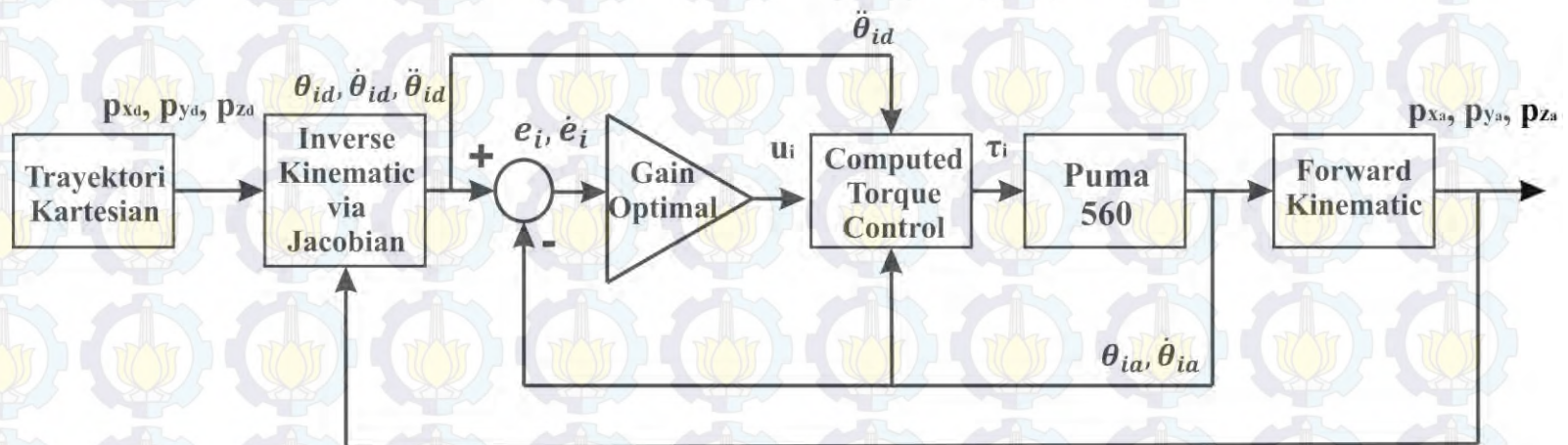
# Perancangan Sistem





# PERANCANGAN SISTEM

## Diagram Blok Sistem Keseluruhan

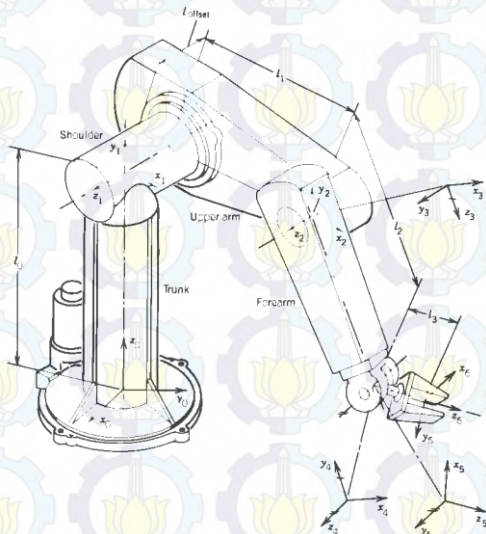


# PERANCANGAN SISTEM

## Forward Kinematic

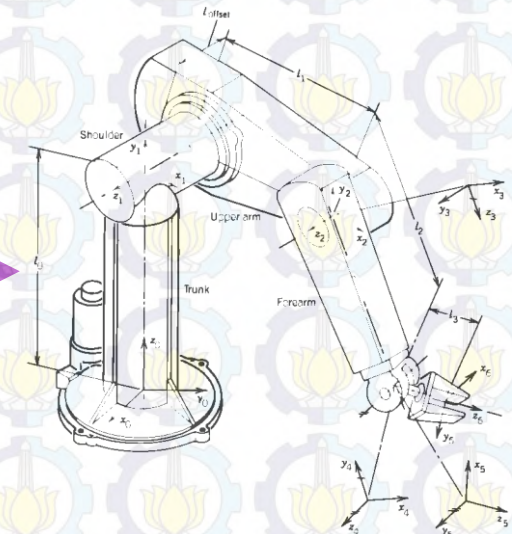
Pemodelan  
Plant

Kontroler



Kaidah  
Denavit  
Hartenberg

$\theta_i, \alpha_i, a_i, d_i$



$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$

Ruang Joint

$$T_n^0 = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ruang Kartesian



# PERANCANGAN SISTEM

## Kaidah Denavit Hartenberg

Joint ke-i	$\theta_i (^{\circ})$	$\alpha_i (^{\circ})$	$a_i$ (mm)	$d_i$ (mm)
1	*	90	0	0
2	*	0	431,8	0
3	*	-90	19,1	125,4
4	*	90	0	431,8
5	*	-90	0	0
6	*	0	0	0

Tabel Parameter D-H PUMA 560

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,\alpha_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^0 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 431,8c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 431,8s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & 19,1c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & 19,1s\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 125,4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 431,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pemodelan  
Plant

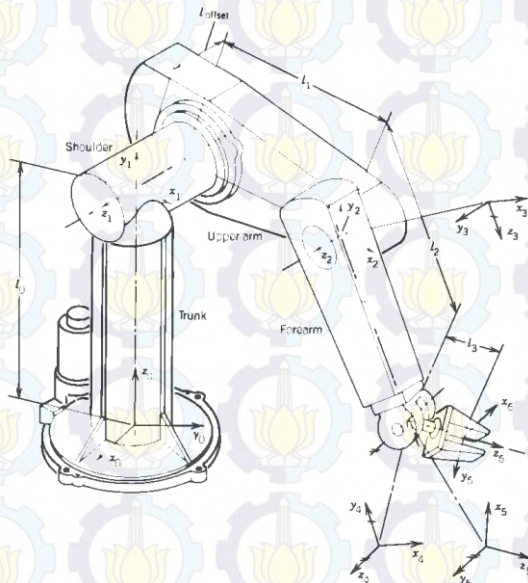
Kontroler

# PERANCANGAN SISTEM

## Inverse Kinematic

Pemodelan  
Plant

Kontroler

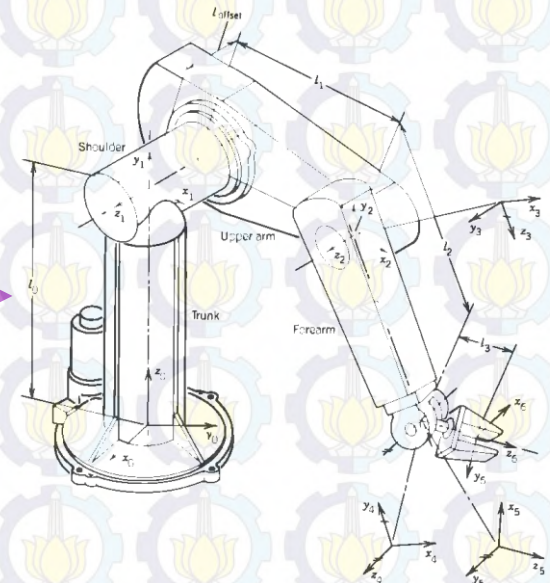


$$T_n^0 = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ruang Kartesian

Jacobian  
Manipulator

$$v = J_{n \times n} \dot{\theta}$$



$$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$$

Ruang Joint



## Jacobian Manipulator

$$v = J_{n \times n} \dot{\theta} \rightarrow \dot{\theta} = J_{n \times n}^{-1} v \rightarrow \theta(t) = \int \dot{\theta} dt$$

dengan:

$v$ : Vektor kecepatan *end-effector*,  $v \in R^n$

$\dot{\theta}$ : Kecepatan sudut *joint*,  $\dot{\theta} \in R^n$

$J_{n \times n}$ : *Jacobian manipulator*,  $n$  adalah jumlah DOF manipulator

$$T_n^0(\theta) = \begin{bmatrix} R_n^0(\theta) & p_n^0(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Vektor Kecepatan End-effector**

$$v = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z & \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T$$

**Matriks Jacobian**

$$J = \begin{bmatrix} J_{v0} & J_{v1} & J_{v2} & J_{v3} & J_{v4} & J_{v5} \\ J_{\omega0} & J_{\omega1} & J_{\omega2} & J_{\omega3} & J_{\omega4} & J_{\omega5} \end{bmatrix}$$

□ Perhitungan vektor kecepatan *end-effector*:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s\theta_p \\ 0 & c\theta_r & -c\theta_p s\theta_r \\ 0 & s\theta_r & c\theta_p s\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_y \end{bmatrix}$$

**Kecepatan Linear**

**Kecepatan Angular**

dengan:

$$S_i = \sin\theta_i; C_i = \cos\theta_i$$

$\theta_r$ : Sudut roll;  $\theta_p$ : Sudut pitch;  $\theta_y$ : Sudut yaw

□ Perhitungan matriks *jacobian*:

$$J_{vi} = z_{i-1}^0 \times (p_n^0 - p_{i-1}^0) \quad \text{Jacobian Linear}$$

$$J_{\omega i} = [z_0 \ z_1 \ \dots \ z_{i-1}] \quad \text{Jacobian Angular}$$

dengan:

$$z_0^0 = k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T; z_{i-1}^0 = R_{i-1}^0 k; p_0^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Pemodelan  
Plant

Kontroler

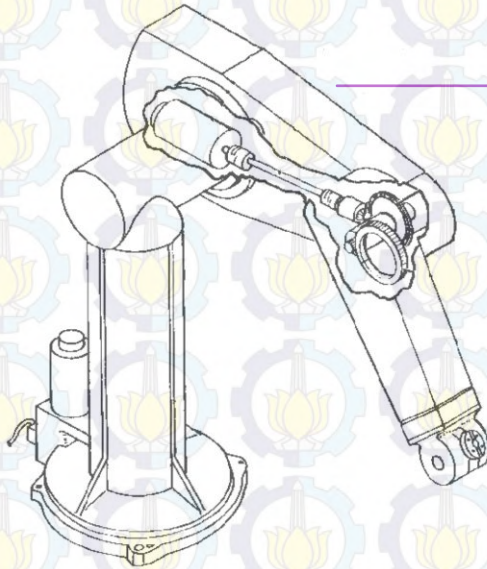


# PERANCANGAN SISTEM

## Dinamika

Pemodelan  
Plant

Kontroler



PUMA 560

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) = \tau \cong M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau$$

dengan :

$M(q)$ : Matriks Inersia  $\rightarrow$  Simetris dan Positif Definit

$V(q, \dot{q})$ : Vektor Koriolis

$F(\dot{q})$ : Vektor Friksi

$G(q)$ : Vektor Gravitasi

$\tau$ : Torsi Masukan

$$M(\theta) = [m_{ij}(\theta)]_{n \times n}, i, j = 1, \dots, n$$

$$m_{ij}(\theta) = m_{ji}(\theta)$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) + G(\theta) \cong N(\theta, \dot{\theta}) = [n_i(\theta, \dot{\theta})]_{n \times 1}, i = 1, \dots, n$$



# PERANCANGAN SISTEM

## Dinamika PUMA 560

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \cong \boxed{M(\theta)}\ddot{\theta} + \boxed{N(\theta, \dot{\theta})} = \tau$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & 0 & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & 0 \\ 0 & 0 & m_{34} & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{35} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pemodelan  
Plant

Kontroler

# PERANCANGAN SISTEM

## Computed Torque Control

$$e_i(t) = q_{di}(t) - q_i(t), i = 1, \dots, n \xrightarrow{\frac{d\ddot{e}_i(t)}{dt^2}} \ddot{e}_i(t) = \ddot{q}_{di}(t) - \ddot{q}_i(t), i = 1, \dots, n$$

$$M(\theta)\ddot{\theta}_i + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau \longrightarrow \ddot{\theta}_i = M^{-1}(\theta)[\tau_i - N(\theta, \dot{\theta})]$$

$$\ddot{e}_i(t) = \ddot{\theta}_{di}(t) + M^{-1}(\theta)[N(\theta, \dot{\theta}) - \tau_i]$$

$$u_i = \ddot{\theta}_{di} + M^{-1}(\theta)[N(\theta, \dot{\theta}) - \tau_i] \quad x = [e_i \ \dot{e}_i]^T$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$\tau_i = M(\theta)[\ddot{\theta}_{di} - u_i] + N(\theta, \dot{\theta})$$

Pemodelan  
Plant

Kontroler



# PERANCANGAN SISTEM

## Linear Quadratic Regulator

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \dot{x} = (A - BK)x \quad \text{PI} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad K = R^{-1}B^T P \quad u = -Kx$$

Pemodelan  
Plant

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix}, \text{ dengan } Q_{11}, Q_{22} > 0$$

Kontroler

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad R = c, \text{ dengan } c > 0 \quad u = -(K_1 e_i + K_2 \dot{e}_i)$$



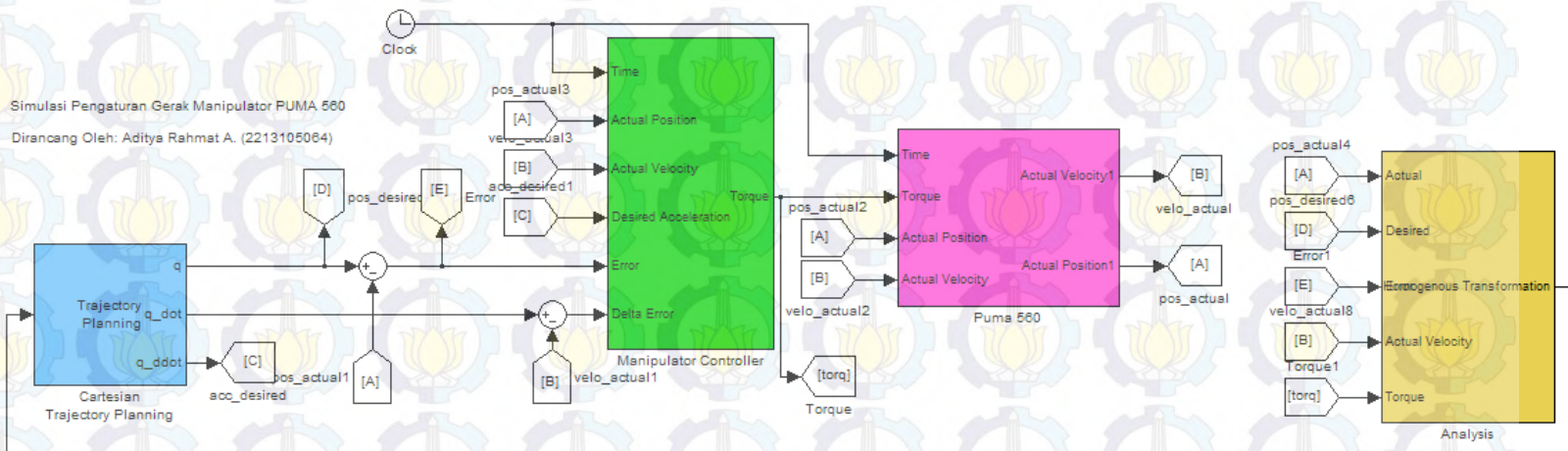
# Simulasi & Hasil Pengujian





# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Diagram Simulink Sistem Keseluruhan



# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Inisialisasi Pengujian Sinyal Step

$$\theta_d = [30^\circ \ 30^\circ \ 30^\circ \ 45^\circ \ 100^\circ \ 166^\circ]^T$$
$$IC = [0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$$

Inisialisasi Kondisi Awal dan Nilai Referensi Tiap *Joint*

Respons  
*Joint*

$u = -(e_i + \dot{e}_i)$  Sinyal control  $u$  untuk Kontrol CTC

$u = -(K_1 e_i + K_2 \dot{e}_i)$  Sinyal control  $u$  untuk Kontrol *Optimal* CTC

Inverse  
Kinematic

## Hasil Pengujian Tiap Respons Sistem menggunakan *Optimal* CTC

Sistem	1	2	3	4
Rata-rata RMSE (°)	6,001	5.884	6.101	7.567
Rata-rata $T_s$ (Detik)	0,336	0,375	0,472	0,564

dengan:

Sistem 1:  $Q = [1200000 \ 0;0 \ 10000]$ ;  $R = 2$ ;  $K = [774,59 \ 80,9271]$

Sistem 2:  $Q = [900000 \ 0;0 \ 10000]$ ;  $R = 2$ ;  $K = [670,82 \ 79,6344]$

Sistem 3:  $Q = [300000 \ 0;0 \ 9000]$ ;  $R = 2$ ;  $K = [387,298 \ 72,6264]$

Sistem 4:  $Q = [100000 \ 0;0 \ 3000]$ ;  $R = 2$ ;  $K = [223,6068 \ 44,1272]$

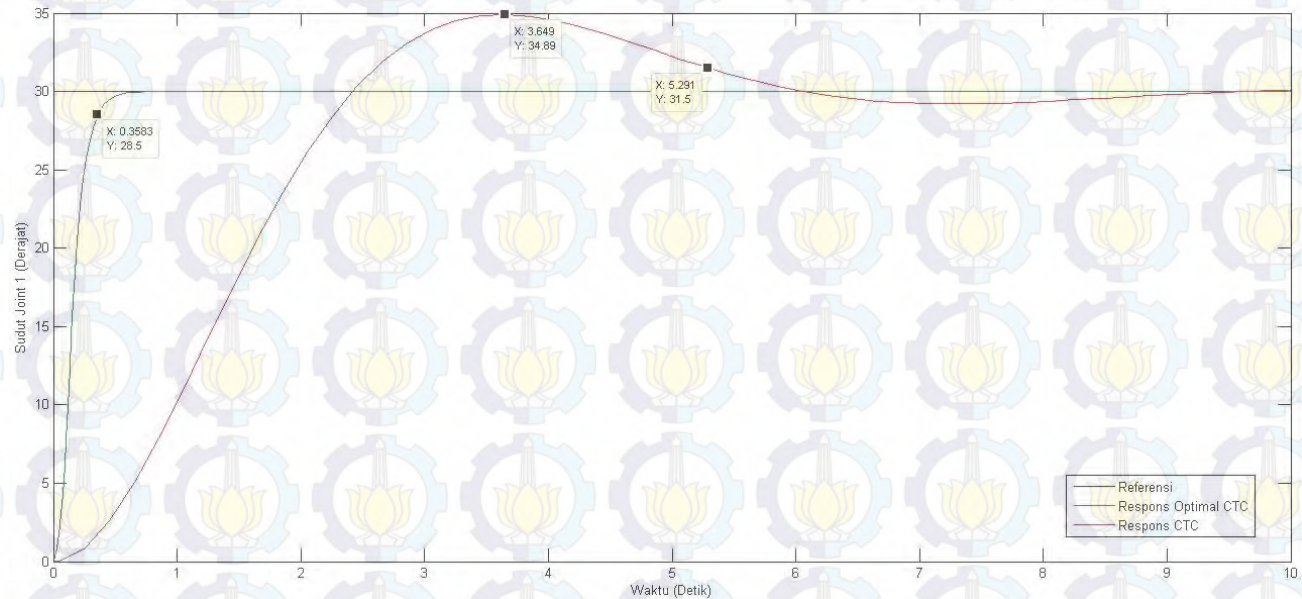
Penugasan  
Lingkaran



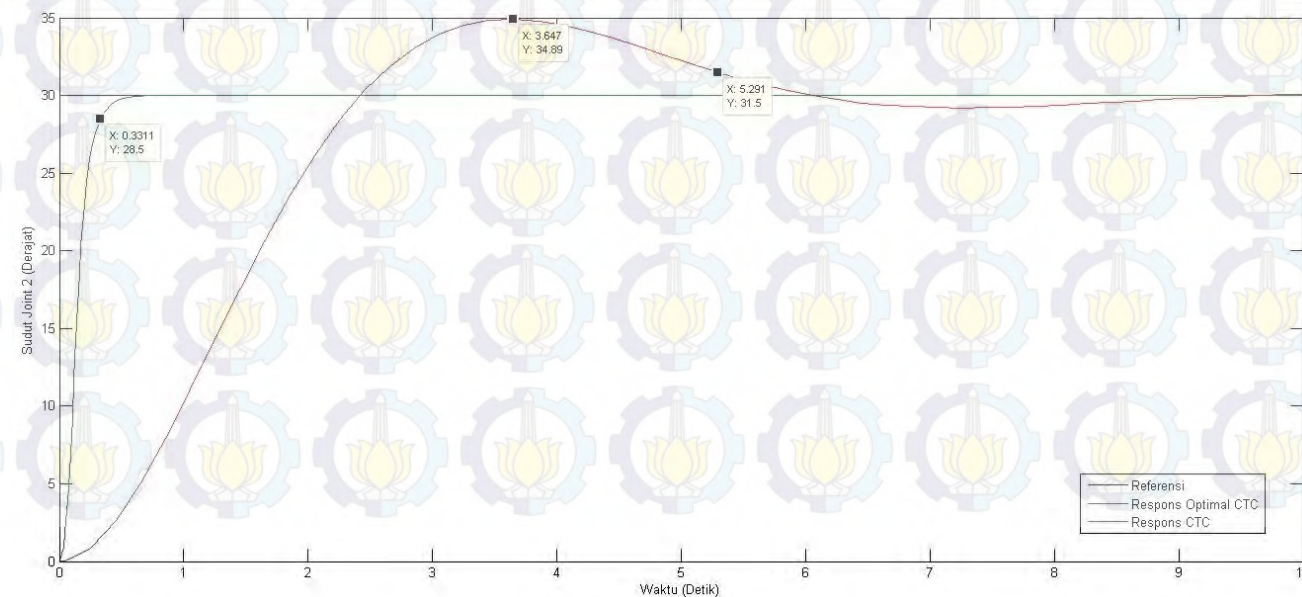
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Respons *Joint* Terhadap Sinyal Step

### Joint 1



### Joint 2



Respons  
*Joint*

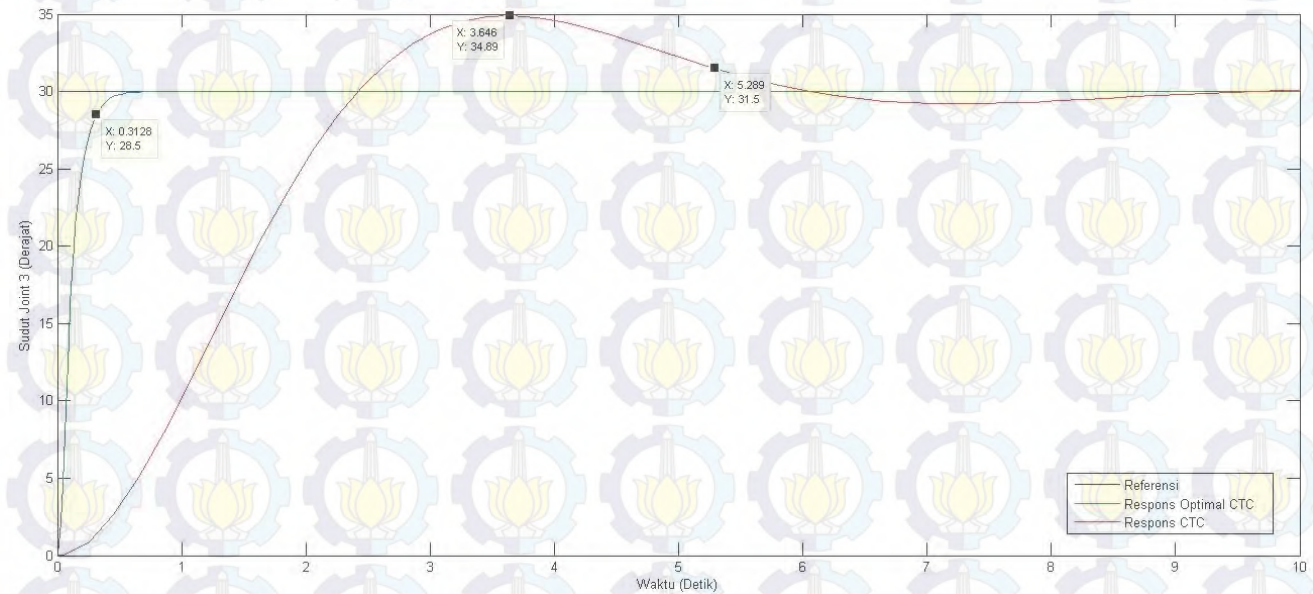
Inverse  
Kinematic

Penugasan  
Lingkar

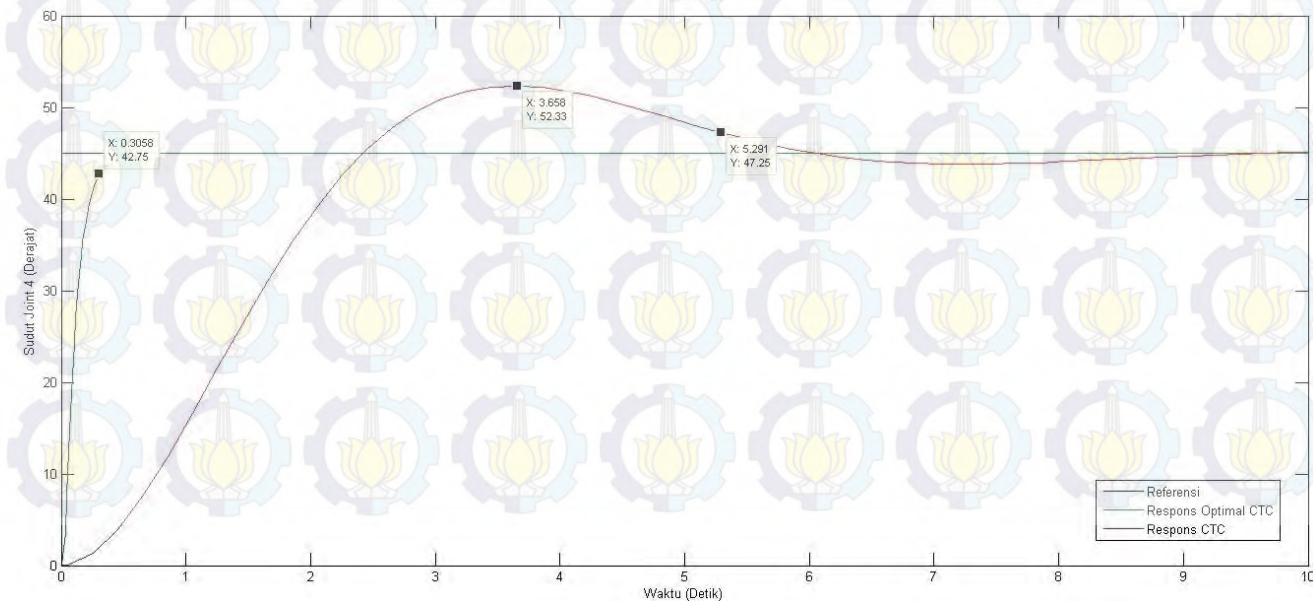
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Respons *Joint* Terhadap Sinyal Step

### □ Joint 3



### □ Joint 4



Respons  
*Joint*

Inverse  
Kinematic

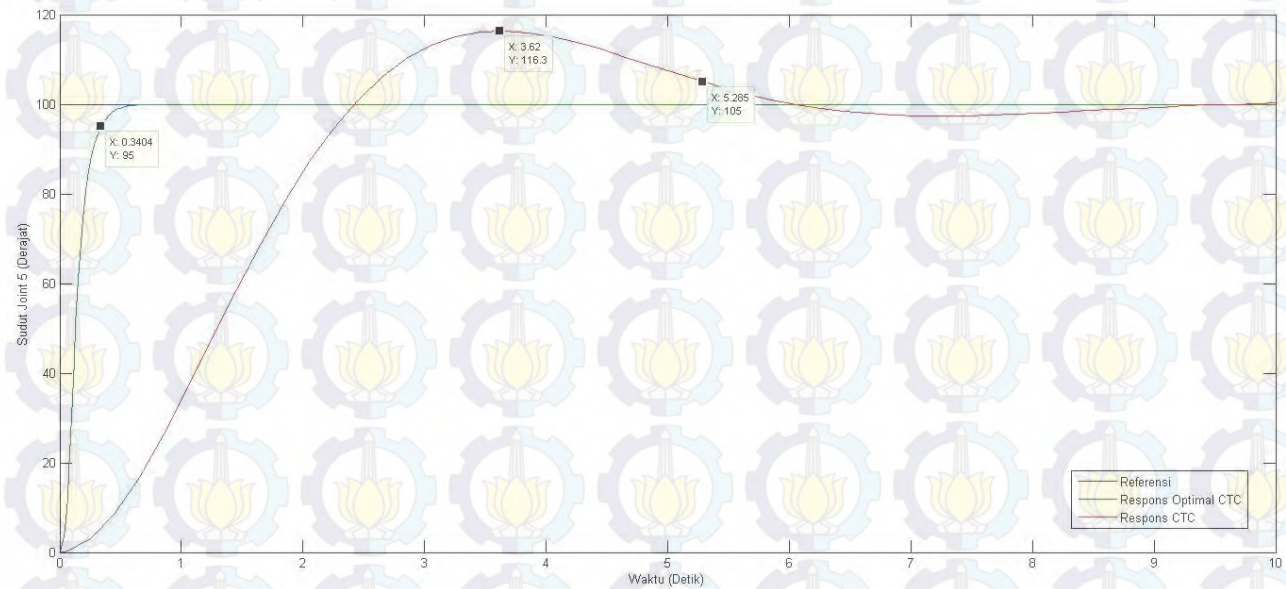
Penugasan  
Lingkar



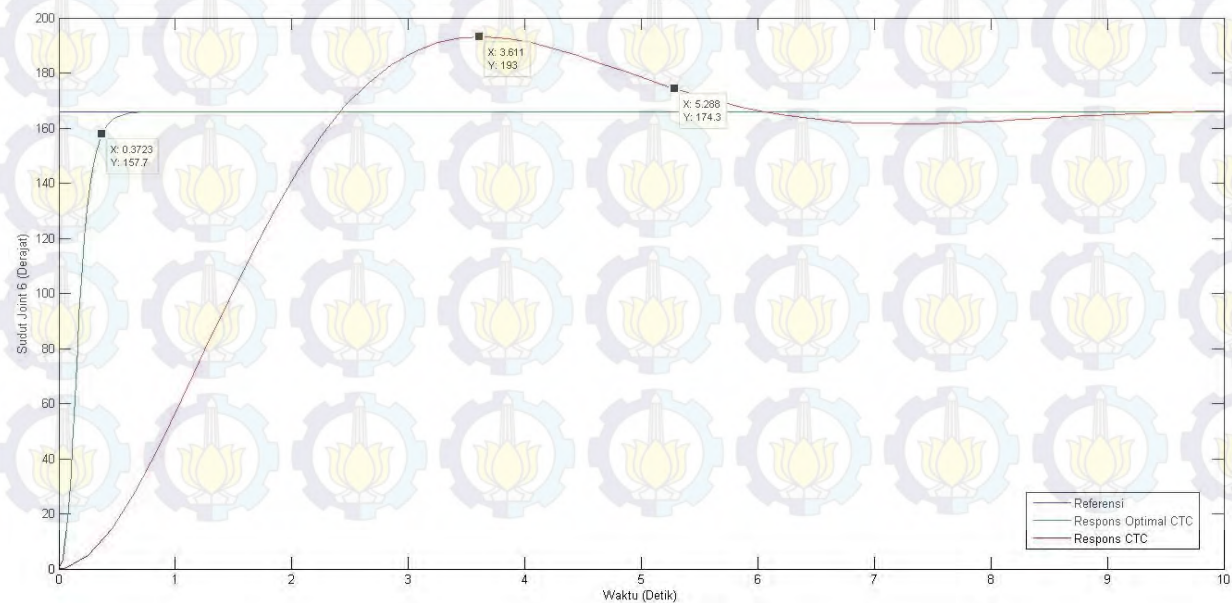
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Respons *Joint* Terhadap Sinyal Step

### Joint 5



### Joint 6



Respons  
*Joint*

Inverse  
Kinematic

Penugasan  
Lingkar

# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Hasil Pengujian

Respons  
Joint

CTC	Joint	Ts (5%) (Detik)	%Mp	Optimal CTC	Joint	Ts (5%) (Detik)	%Mp
	1	5,291	16,3		1	0,3853	0
	2	5,291	16,3		2	0,3311	0
	3	5,289	16,3		3	0,3128	0
	4	5,291	16,3		4	0,3058	0
	5	5,285	16,3		5	0,3404	0
	6	5,288	16,3		6	0,3723	0

Inverse  
Kinematic

CTC	Joint	RMSE (°)	Optimal CTC	Joint	RMSE (°)
	1	3,939		1	2,694
	2	3,939		2	2,694
	3	3,939		3	2,694
	4	5,908		4	4,041
	5	13,13		5	8,980
	6	21,79		6	14,907
Rata-rata:		8,77	Rata-rata:		6,001

Penugasan  
Lingkaran

RMSE Respons *Joint* Terhadap Sinyal *Step*



# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Pengujian dan Validitas Nilai Sudut *Joint*

No.	Masukan (cm)			Keluaran ( $^{\circ}$ )					
	$p_x$	$p_y$	$p_z$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1	0	-50	1	-75,48	-54,78	24,38	-180	-30,4	255,5
2	12,36	-40	1	-55,4	-61,07	37,44	0	23,63	55,4
3	32,36	-20	1	-12,47	-63,89	43,39	0	20,51	12,47
4	40	0	1	18,27	-62,46	40,35	0	22,11	-18,27
5	32,36	20	1	50,96	-63,89	43,39	0	20,51	-50,96
6	12,36	40	1	90,26	-61,07	37,44	0	23,63	-90,26
7	0	50	1	104,5	-54,78	24,38	0	30,4	-104,5

Hasil nilai sudut *joint* terhadap masukan posisi *end-effector*

No.	Masukan (derajat)						Keluaran (cm)		
	1	2	3	4	5	6	$p_x$	$p_y$	$p_z$
1	-75,48	-54,78	24,38	-180	-30,4	255,5	0	-50	1
2	-55,4	-61,07	37,44	0	23,63	55,4	12,36	-40	1
3	-12,47	-63,89	43,39	0	20,51	12,47	32,36	-20	1
4	18,27	-62,46	40,35	0	22,11	-18,27	40	0	1
5	50,96	-63,89	43,39	0	20,51	-50,96	32,36	20	1
6	90,26	-61,07	37,44	0	23,63	-90,26	12,36	40	1
7	104,5	-54,78	24,38	0	30,4	-104,5	0	50	1

Pengujian validitas hasil nilai sudut *joint* melalui perhitungan *forward kinematic*

Respons  
*Joint*

Inverse  
Kinematic

Penugasan  
Lingkaran



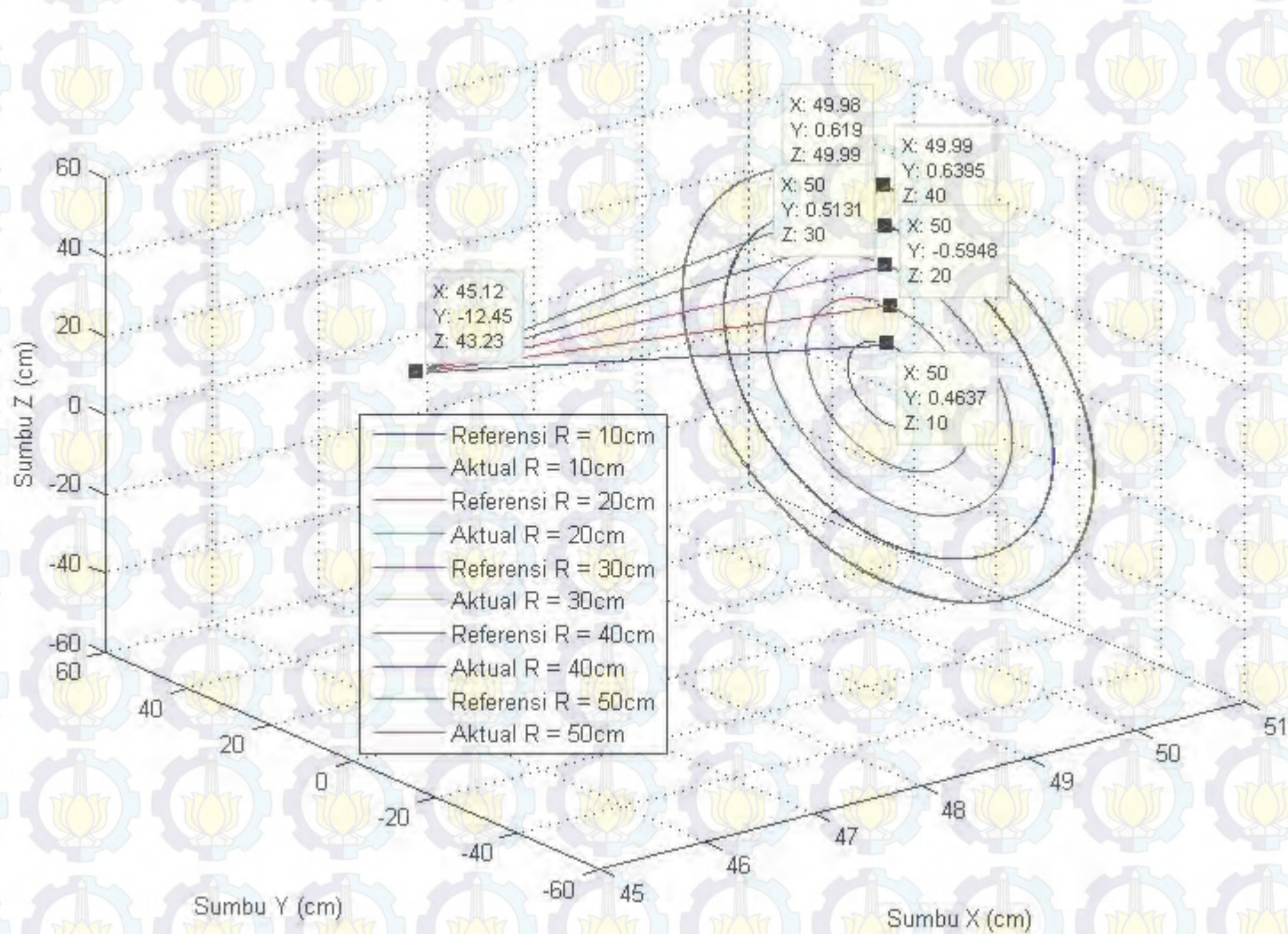
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Hasil Penugasan Trayektori Lingkaran

Respons  
Joint

Inverse  
Kinematic

Penugasan  
Lingkaran

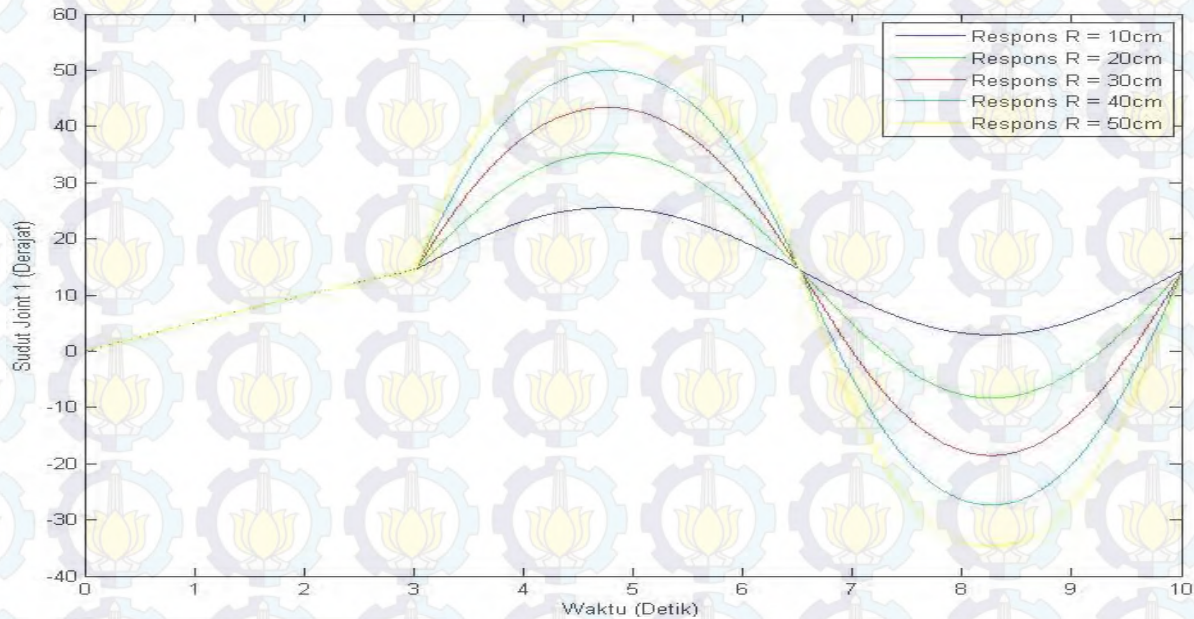




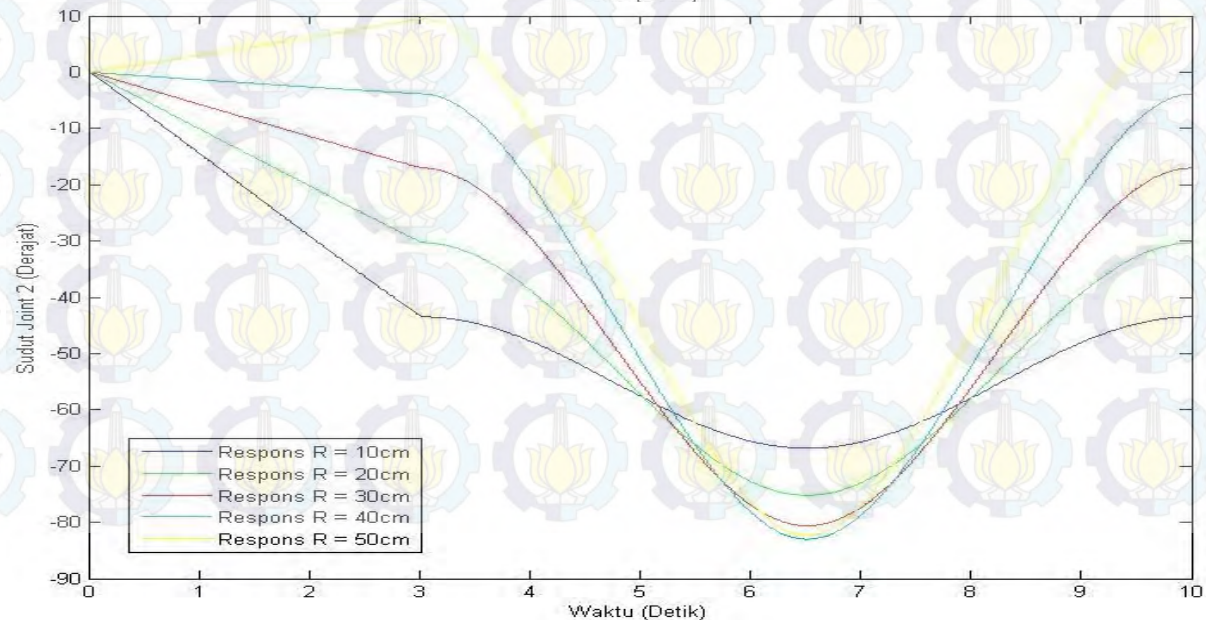
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Hasil Penugasan Trayektori Lingkaran

### Joint 1



### Joint 2



Respons  
Joint

Inverse  
Kinematic

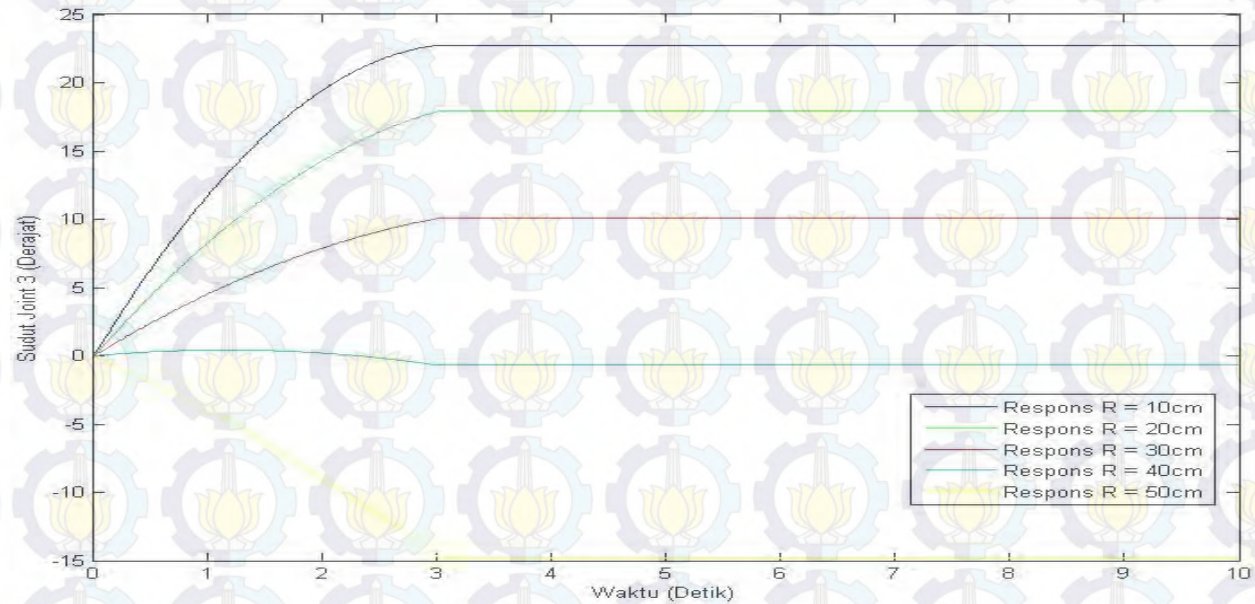
Penugasan  
Lingkaran



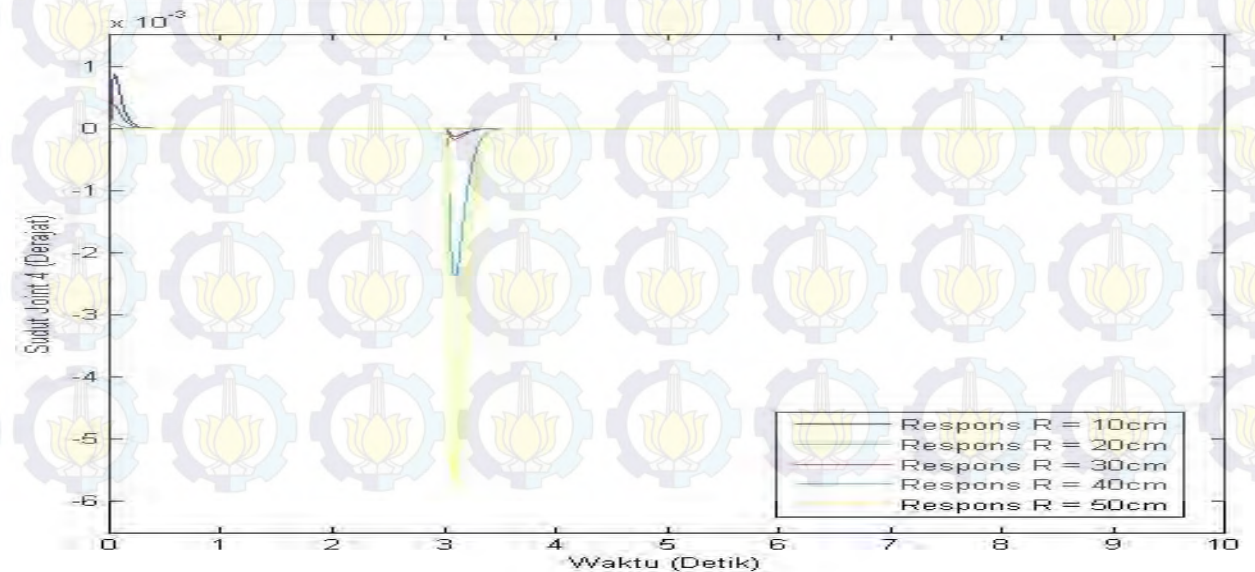
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Hasil Penugasan Trayektori Lingkaran

### Joint 3



### Joint 4



Respons  
Joint

Inverse  
Kinematic

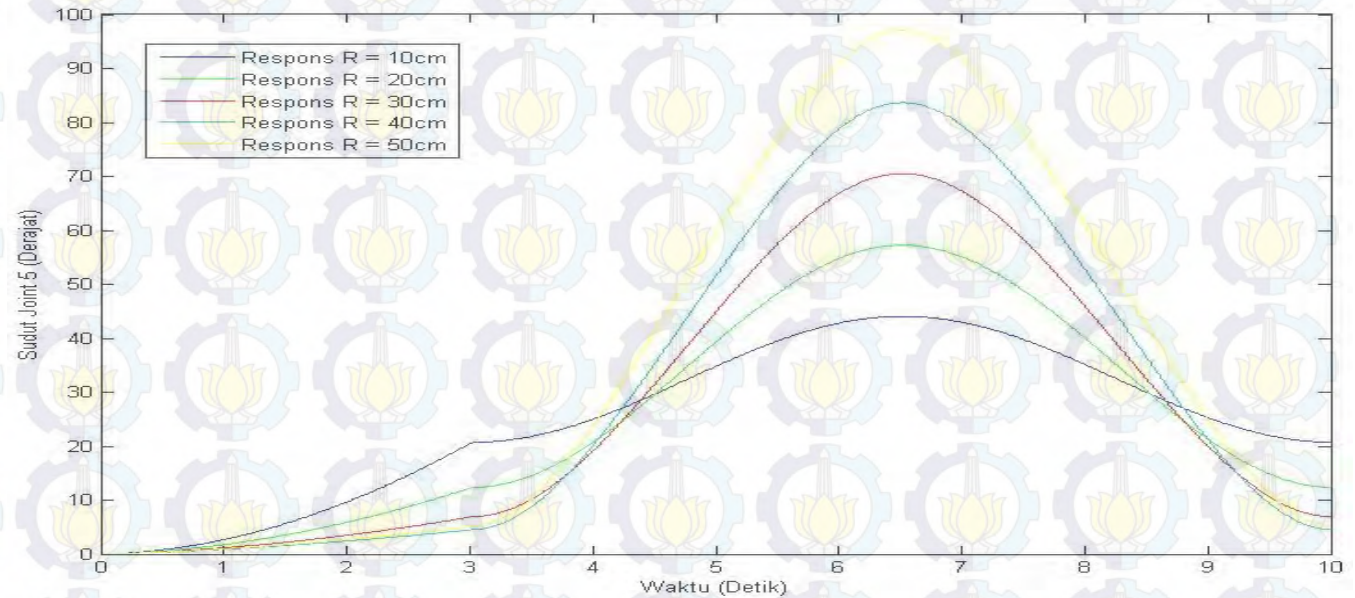
Penugasan  
Lingkaran



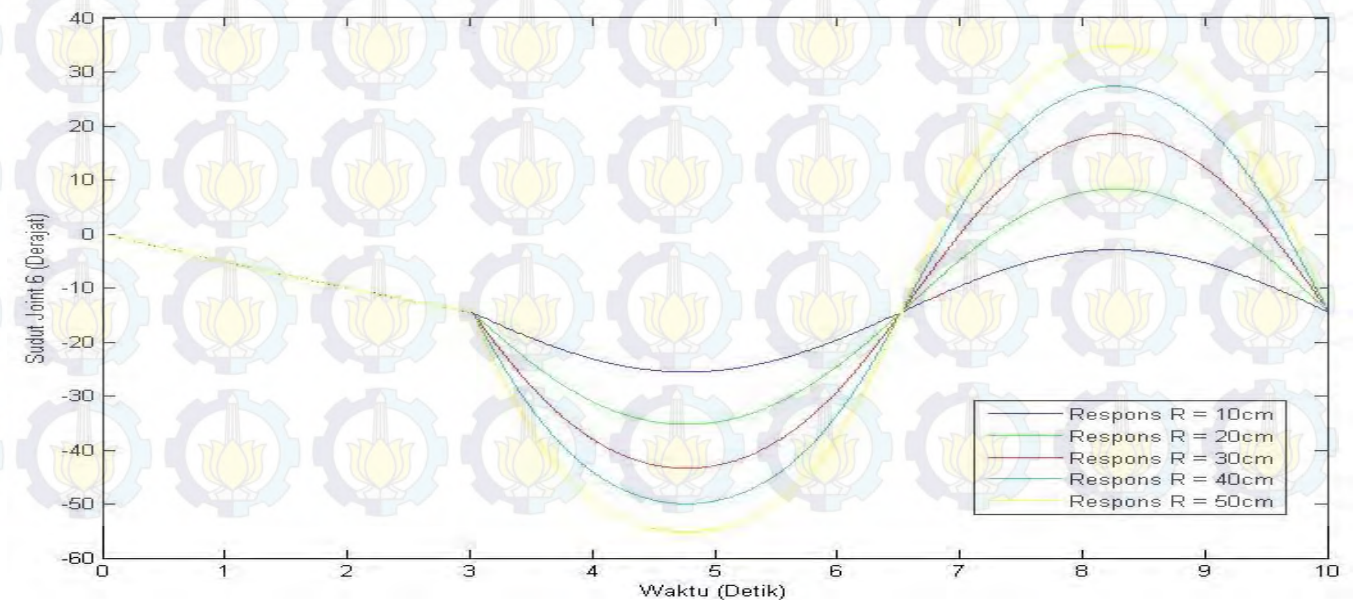
# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Hasil Penugasan Trayektori Lingkaran

### Joint 5



### Joint 6



Respons  
Joint

Inverse  
Kinematic

Penugasan  
Lingkaran



# SIMULASI & HASIL PENGUJIAN

## Analisis RMSE

Metode	Penugasan	RMSE Posisi End-Effector (cm)		
		X	Y	Z
Optimal CTC	Lingkar Radius 10 cm	0,0016	0,0036	0,0075
	Lingkar Radius 20 cm	0,0028	0,0061	0,0065
	Lingkar Radius 30 cm	0,0053	0,0116	0,0071
	Lingkar Radius 40 cm	0,0088	0,0117	0,0085
	Lingkar Radius 50 cm	0,0142	0,0165	0,0112
Rata-rata RMSE		0,0065	0,0099	0,0082
CTC	Lingkar Radius 10 cm	0,5593	2,1514	2,4294
	Lingkar Radius 20 cm	0,5778	3,7329	3,6488
	Lingkar Radius 30 cm	1,2075	5,7475	5,7471
	Lingkar Radius 40 cm	1,785	8,4642	9,0944
	Lingkar Radius 50 cm	8,852	12,336	11,068
Rata-rata RMSE		2,5963	6,4864	6,3975

**RMSE Penugasan Lingkaran**



Penutup





## Kesimpulan

## Saran

1. Kontroler *optimal* CTC mampu mengurangi nilai RMSE dari respons tiap sudut *joint* dibandingkan dengan CTC sebesar  $6,8897^0$ .
2. Penyelesaian *inverse kinematic* menghasilkan nilai sudut *joint* yang akurat terbukti melalui uji validitas dari hasil penyelesaian tersebut.
3. Kontroler *optimal* CTC mampu mengatur gerak PUMA 560 lebih akurat dari CTC dengan rata-rata nilai RMSE untuk pergerakan sumbu  $x = 0,0065$  cm; sumbu  $y = 0,0099$  cm; sumbu  $z = 0,0082$  cm untuk pengugasan trayektori lingkaran dengan radius 10 hingga 50 cm.
4. Metode *optimal* CTC dan *inverse kinematic* melalui *jacobian manipulator* mampu mengatur pergerakan *manipulator* PUMA 560 dalam koordinat kartesian.



# PENUTUP

1

Kontroler *optimal* CTC membutuhkan informasi model dinamika dari *manipulator* yang akan dikontrol, sehingga untuk pengaturan pada *manipulator* 6-DOF jenis lain disarankan terdapat informasi model dinamikanya.

2

Pengaturan gaya *end-effector* dapat dilakukan untuk penugasan seperti *grinding* dan *assembling*.

Kesimpulan

Saran





Terima  
kasih